

# Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina

Romina DÍAZ GÓMEZ<sup>1,3</sup>, Fernanda J. GASPARI<sup>2</sup>, Sergio M. GEORGIEFF<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Becaria posdoctoral. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Correo electrónico: rominadiazgomez@gmail.com.

<sup>2</sup> Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Diagonal 113, N° 469. La Plata. Provincia de Buenos Aires. Argentina. Correo electrónico: fgaspari@agro.unlp.edu.ar

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205, San Miguel de Tucumán, Tucumán. Argentina. CONICET.

► **Resumen** — Las cuencas hidrológicas localizadas en las laderas orientales de las sierras en el Noroeste Argentino se caracterizan por presentar un marcado quiebre en la transición ladera piedemonte, precipitaciones de origen orográfico, registros de eventos de inundación y escasos registros hidrométricos. Los parámetros morfométricos permiten definir la interacción entre las características geológicas y geomorfológicas, y los patrones físicos superficiales, caracterizando de manera cuantitativa la posible respuesta de la cuenca ante un escenario hidrológico. El objetivo de este trabajo fue cuantificar de manera objetiva las características morfométricas de las cuencas hidrográficas del Faldeo Oriental de las Sierras del Aconquija (FOA) y Sierras del Sudoeste (SS). Se realizó por medio de un análisis comparativo, a nivel geoespacial con Sistemas de Información Geográfica, aplicando el modelo hidrológico HEC-Geo HMS®, basado en el modelo de elevación digital de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Los resultados indican que las cuencas FOA y SS se clasifican en cuencas medianas y la mayoría de forma alargada. Comparativamente, las cuencas Balderrama y Romano tienen mayor potencial de erosión que las cuencas Gastona y Chico. De la misma manera, en las cuencas de las SS, Chavarría y Singuil tienen mayor torrencialidad (tiempos de concentración menor a 7 horas) que las cuencas de Marapa y Matazambi (tiempos de concentración mayor a 10 horas). Los mapas y los nuevos datos obtenidos tienen una aplicación directa en las propuestas de planes de manejo integral de cuencas.

**Palabras clave:** Morfometría, cuenca hidrográfica, Noroeste Argentino.

► **Abstract** — “Morphometric aspects of subtropical basins of Northwest Argentina”. The hydrological basin located on the eastern slopes of the mountains in the Northwest Argentina are characterized by a marked break in the slope piedmont Transition, orographic rainfall, flood events and few hydrometric records. Morphometric parameters used to define the interaction between geological and geomorphological characteristics, and surface physical patterns, characterizing quantitatively the possible response of the basin to a hydrological scenario. The objective of this study was to quantify the morphometric characteristics of the hydrological basins of the eastern slope of the Aconquija Ranges (FOA, acronym for Faldeo Oriental del Aconquija) and Southwest Ranges of Tucumán (SS). Through a comparative analysis, using geographic information systems and hydrological model HEC-Geo HMS® base on the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER GDEM) digital elevation model. The results suggest that the FOA and SS watersheds are the most elongated and classified as medium-sized basins. Comparatively the Balderrama and Romano Basins have major erosion potential than the Gastona and Río Chico Basins. In the same way, in the SS Basins, Chavarría and Singuil Basins have major torrential characteristics (concentration times less than 7 hours) than Marapa and Matazambi Basins (concentration greater than 10 hours). The maps and the new data (tables) obtained have a direct application in the proposals of watershed management plans.

**Keywords:** Morphometry, hydrological basin, Northwest of Argentina.

## INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de su funcionamiento, una cuenca hidrográfica puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo, la cobertura vegetal y uso del suelo (Henaos, 1988; Gaspari, 2002; Gaspari *et al.*, 2009). Hidrológicamente, la cuenca funciona como un colector que recibe la precipitación y convierte, parte de ésta, en escurrimiento. Esta transformación depende de sus condiciones climáticas y de las características físicas particulares (Henaos, 1988; Gaspari *et al.*, 2009).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales (Gaspari 2002). Las mismas, relacionan las características físicas de la cuenca, y las características hidrológicas de la zona, altamente dinámicas. Permiten explicar la interacción entre las características geológicas y geomorfológicas con los patrones físicos superficiales, mostrando de manera cuantitativa, la posible respuesta de la cuenca ante un escenario hidrológico. La geomorfología cuantitativa incluye los parámetros físicos de la red de drenaje que derivan de los trabajos tradicionales de Horton (1945), Strahler (1957) y Morisawa (1959). Las principales características físicas relacionadas a la morfometría de la cuenca definen los parámetros de forma, relieve y red de drenaje (Senisterra *et al.*, 2014).

Se ha demostrado que en ciertas áreas, algunas características de los hidrogramas, así como la cantidad de flujo, están fuertemente relacionadas a algunos factores hidrogeomorfológicos medibles en la cuenca, y que un análisis detallado de los parámetros morfométricos, permitiría alcanzar una determinación preliminar de la intensidad de la torrencialidad tanto en cuencas carentes de aforos como en aquellas, que aún poseyéndolas, presentan una compleja dinámica hidrogeomorfológica (Neder y Puchulu 1995, Mesa, 2006). En la provincia de Tucumán, diversos autores, realizaron este tipo de estudio de manera aislada en diferentes cuencas:

Arcuri (1995) en la cuenca del río Medina, Toledo (2005) en la cuenca del río San Ignacio, Mesa (2006) en la cuenca del río Lules y Busnelli (2009) estudio la cuenca del río Gastona. Sin embargo, en las cuencas hidrográficas del Faldeo Oriental de las Sierras del Aconquija (FOA) y Sierras del Sudoeste (SS) son escasos los estudios comparativos, a escala regional, que cuantifiquen espacialmente las características morfométricas. Es importante señalar que se trata de zonas con escasos registros hidrométricos y un análisis detallado de sus parámetros morfométricos podría reflejar la respuesta hidrológica de las mismas.

El objetivo de este trabajo es cuantificar de manera objetiva las características morfométricas de las cuencas hidrográficas FOA y SS.

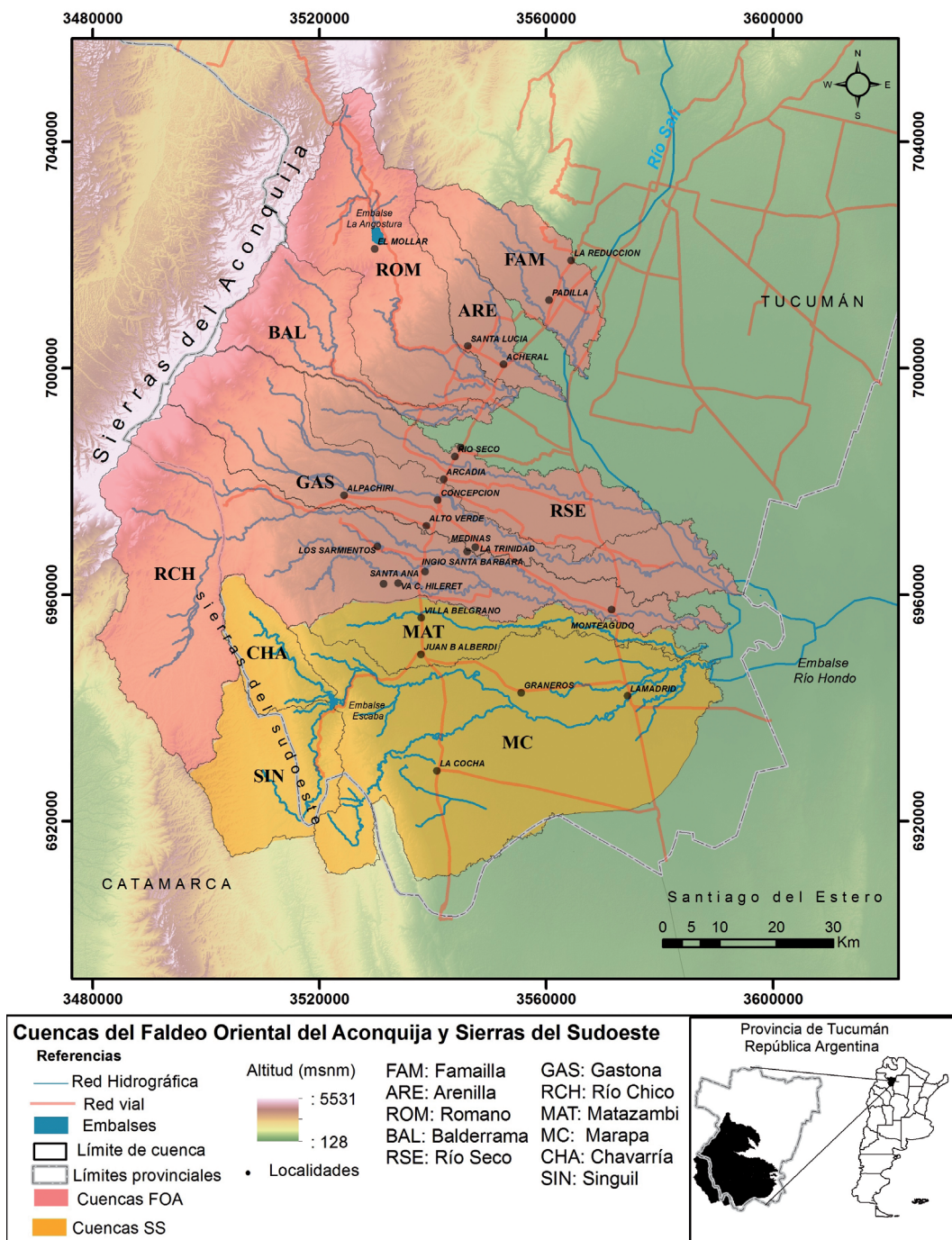
## ÁREA DE ESTUDIO

Las cuencas hidrológicas estudiadas se encuentran en los faldeos orientales de las Sierras del Aconquija (FOA) y del Sudoeste (SS). El *divortium aquarum* de estas sierras constituye el límite provincial entre Tucumán y Catamarca, Argentina. La Sierra del Aconquija conforma la entidad orográfica de mayor altura de la provincia de Tucumán (Rohmeder, 1949); mientras que, las Sierras del Sudoeste, ubicadas más al sur, se dividen en dos brazos: hacia el oeste la Serranía de Santa Ana y hacia el este las Sierras de Narváez, entre ambas se ubica el Embalse de Escaba.

Las cuencas FOA y SS forman parte del sistema fluvial de la gran Cuenca del río Salí-Dulce que desembocan en el embalse Río Hondo. Abarcan una superficie total de 9.222 km<sup>2</sup> con importantes núcleos poblacionales distribuidos en la zona media de las mismas. Presentan un relieve montañoso de 5.300 msnm de altura máxima y 100 kilómetros de largo en sentido norte-sur, que actúa como barrera orográfica frente a los vientos cálidos y húmedos estivales provenientes del anticiclón del Atlántico (Fernández *et al.*, 2004). El clima es de montaña húmedo-templado, con lluvias estivales regionales. Las precipitaciones aumentan de este a oeste,

alcanzando 900 mm en la zona pedemontana del centro y sur y en la zona montañosa entre 1.000 mm y 2.000 mm anuales, sien-

do ésta el área más húmeda de la provincia (Guido *et al.* 1998) (Figura 1).



**Figura 1.** Área de estudio. Cuencas del Faldeo Oriental del Aconquija y Sierras del Sudoeste.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra situada en el ámbito de la provincia geológica de Sierras Pampeanas Noroccidentales (Camínos, 1979) o Sierras Pampeanas Septentrionales (Aceñolaza y Toselli, 1981). La llanura oriental tucumana pertenece a la provincia geológica de la Llanura Chaco-Pampeana o Pampasia, denominada por Ramos (1999) como Llanura Chaco-Bonaerense. El origen de las rocas que conforman los núcleos de los bloques sierras del Aconquija son meta-areniscas y metapelitas del Precámbrico superior – Cámbrico inferior (Toselli *et al.*, 1998), entre 750 y 500 millones de años. Los sedimentos originales fueron metamorfozados y deformados entre el Ordovício superior – Carbonífero, a lo que se sumó la intrusión de cuerpos graníticos de distintos tamaños. La edad y forma de emplazamiento de estas rocas es muy complejo y está asociado a distintas fases de actividad tectónica (movimientos laterales y verticales de las rocas en subsuelo). Sobre estas rocas metamórficas e ígneas se han formado distintos tipos de depósitos sedimentarios (conglomerados, areniscas y lutitas) (Georgieff, 2007). La configuración actual del paisaje (valles y sierras) es relativamente joven, se produjo por sucesivos movimientos ascensionales y laterales vinculados a la dinámica de los Andes, cuya fase principal culminó hace unos 2 millones de años (Mon y Mansilla, 1998). Cerca de los sectores cumbrales se encuentran sedimentos de origen glaciar reabajados por acción fluvial entre el Pleistoceno y Holoceno, coincidiendo con períodos glaciares-interglaciares (Busnelli, 2009).

En la cuenca del río Chavarría los afloramientos son areniscas finas calcáreas, tobáceas y plagioclásicas que alternan con capas ricas en carbonato Dal Molin *et al.* (2003). En las terrazas del río Marapa afloran areniscas tobáceas, con gran contenido de plagioclasas y vidrio. Los depósitos fluviales se encuentran confinados a fajas que atraviesan de oeste a este la Llanura

tucumana. Están constituidos por sedimentos que fueron transportados y depositados por los ríos Salí, Colorado, Seco, Gastona, Chico, Medina Marapa, Matazambi, San Ignacio y San Francisco. Constituyen capas aluviales de gravas y arenas compuestas por clastos de metamorfitas, granitoides y esporádicamente sedimentitas paleógenas y neógenas.

## METODOLOGÍA

La caracterización morfométrica se realizó según la metodología de Horton (1945) a partir de Gaspari *et al.* (2013). En el área en estudio se realizó a nivel geoespacial aplicando un SIG, el programa ArcGis 10.1® y la extensión HEC-Geo HMS®. La información de entrada es el modelo de elevación digital (DEM), de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2, 2011), generado por Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) / National Aeronautics and Space Administration (NASA) <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Esta información consiste en una base de datos de elevación topográfica estereoscópica de la tierra, de un sistema de radar, cuya resolución espacial es 30 m x 30 m, para Argentina. El DEM fue reproyectado al sistema de coordenadas planas para Argentina (POSGAR 98) Zona 3.

La delimitación de las cuencas en los dos sectores FOA y SS, fue definida a partir del modelo de elevación digital ASTER GDEM y la base de hidrografía superficial de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Tucumán (Giraut *et al.*, 2007).

La extensión HEC-Geo HMS® se basa en un modelo hidrológico que por medio de algoritmos matemáticos y a partir de un modelo de cuenca, permitió definir los parámetros morfométricos, dando lugar a un procedimiento que se conoce como procesamiento del terreno (Terrain pre-processing, según HEC-Geo HMS®). El mismo consiste en una rutina de pasos preestablecida, que permiten el cálculo y generación de las grillas de dirección de flujo, acumulación de



flujo y red hidrográfica en el área de estudio. Para este paso, fue necesario definir un umbral mínimo de acumulación de flujo (número de píxeles o unidades de superficie) para iniciar el cálculo de la red hidrográfica. El valor de inicio por default, corresponde al 1% de la mayor acumulación calculada por el HEC-Geo HMS, y cuanto menor sea ese umbral, mayor será el número de cursos y cuencas delimitadas. En este caso se utilizó un umbral de 0,02 %.

Se ajustaron los cursos fluviales por medio de la digitalización de manera manual a partir del reconocimiento sobre imágenes satelitales Landsat 5TM path 231 / 230, row 78 / 79, con fecha 21/08/2010.

Los parámetros morfométricos cuantitativos definidos fueron:

- Área de la cuenca (A) ( $\text{km}^2$ ): es la superficie que contribuye con la escorrentía superficial y está definida por las divisorias de agua. Según su tamaño se clasifican en cuencas pequeñas, aquellas con áreas menores a  $250 \text{ km}^2$ , cuencas medias entre  $250$  y  $2.500 \text{ km}^2$  y cuencas grandes las que poseen áreas mayores a los  $2.500 \text{ km}^2$  (Chow *et al.*, 1994; Gaspari *et al.*, 2013).

- Perímetro (P) (km) es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas.

- Longitud Axial (La) (km). Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca.

- Pendiente media (PM) (adimensional) es un factor topográfico definido por el cociente entre la diferencia de altura entre dos puntos (D), siendo uno el punto más alejado de la cuenca y de mayor cota (m) y el otro punto donde drena la cuenca, con la distancia existente entre ambos (La; en m) (Chow *et al.*, 1994).

- Factor forma (F) (adimensional) es un factor que relaciona el movimiento del agua y la respuesta de la cuenca a dicho movimiento, controlando la velocidad con que el agua llega al cauce (Cellini, 2005), indicando la regulación de la concentración de la escorrentía superficial. Se establece por el cociente entre el área de la cuenca (A en

$\text{km}^2$ ) y la longitud axial al cuadrado (expresada en km) de la cuenca (La). Se trata de una cuenca de forma redondeada cuando F es igual o cercano a 1 y cuando F es  $< 1$  la forma de la cuenca es alargada.

- Densidad de Drenaje (Dd): expresa la longitud media de los ríos (Lt en km) por unidad de área (A en  $\text{km}^2$ ). Es un indicador de las relaciones entre clima, vegetación y la resistencia del sustrato rocoso o edáfico a la erosión.

- Relación de bifurcación (Rb): es la resultante del cociente entre el número total de ríos de un orden dado (Nr) y el número total de ríos del orden inmediato superior ( $r(n + 1)$ ) (Ecuación 1). Los valores de Rb varían entre 2 y 5 (Strahler, 1957; Langbein y Leopold, 1966) y constituye un número adimensional que cuantifica la ramificación de la red, indicando la forma del sistema de drenaje. Según Senciales González (1999) las altas relaciones de bifurcación indican áreas de fuertes pendientes con rápida concentración de la escorrentía, pero con picos de crecida poco importantes.

Ecuación 1, Relación de bifurcación (Rb):

$$Rb = Nr(n) / r(n + 1)$$

- Relación de longitud (Rl): es la relación existente entre la longitud media de los cauces de un orden dado (Ln) y la longitud media de los cursos de un orden inferior, ( $Ln(n - 1)$ ). Senciales González (1999) menciona que la Relación de longitud (Rl) con un valor de  $Rl > 3$  revela una concentración paulatina de caudales a lo largo del colector principal, mientras que bajas relaciones ( $Rl < 3$ ) muestran mayor energía concentrada bruscamente (Sala y Gay, 1981).

- Porcentaje de longitud de ríos de cada orden (Plrn): expresa la relación porcentual entre la longitud de los ríos del orden considerado (Lr) y la longitud total de los ríos de la cuenca (Lt).

Ecuación 2, Porcentaje de longitud de ríos (Plrn):

$$Plrn = Lr / Lt \times 100$$

– Coeficiente de almacenamiento hídrico (RHO): es el cociente entre la relación de longitud (Rl) y la relación de bifurcación (Rb). Es un parámetro hidrogeomorfológico relacionado con el tiempo en el que se alcanza el caudal máximo, indicador de la torrencialidad de una cuenca. Altos valores indican mayor almacenamiento hídrico en el cauce, un tiempo mayor al caudal máximo, atenuando los procesos erosivos. Está muy relacionado a factores climáticos, geomorfológicos y geológicos.

– Coeficiente de compacidad (Kc): es un parámetro para predecir la variación de la intensidad del flujo en función del tiempo, especialmente cuando los datos hidrológicos son escasos o bien inexistentes (Ecuación 3). Relaciona el perímetro de la cuenca (P, en km) y el área de la misma (A, en km<sup>2</sup>). El mínimo valor es 1 (uno) y corresponde a cuencas circulares, con bajos tiempos de concentración y elevadas descargas en la desembocadura. En cuencas muy elongadas, Kc supera a 2 (dos), la red de drenaje tiende a ser menos compacta y los tiempos de concentración a ser mayores, disminuyendo la torrencialidad.

Ecuación 3, Coeficiente de compacidad:

$$Kc = 0,28 \cdot P / \sqrt{A}$$

– Coeficiente de torrencialidad (Ct): es un indicador de la erodabilidad de una cuenca expresado por el cociente entre el número total de ríos de orden 1 (uno) (N1) y el área de la cuenca (A, en km<sup>2</sup>). Altos valores de Ct indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempo de llegada al pico y alta torrencialidad, debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva (erosión en surcos y en cárcavas). El Ct está relacionado a los procesos de erosión lineal y a la capacidad de descarga de una cuenca.

– Densidad de drenaje de los ríos de orden 1 (Dd1): expresa la longitud media de los ríos de orden 1 (LT1 a LT5) por unidad de área (A en km<sup>2</sup>). Este parámetro presenta una íntima relación con la susceptibilidad erosiva de la subcuenca. Cuanto mayor es la densidad de los ríos de orden 1, mayor es

la torrencialidad manifestada por la mayor erodabilidad del sustrato y la incisión de la erosión hídrica, evidenciada por la mayor longitud de ríos de orden 1 que está íntimamente ligada a la intensificación de la erosión (Busnelli, 2009). También se relaciona con diversos parámetros significativos de la clasificación del paisaje tales como el clima y la vegetación (Moglen *et al.*, 1998), de suelo y roca propiedades (Kelson y Wells, 1989).

– Número de orden de los ríos (N1, N2, N3): es aquel que expresa el grado de ramificación o jerarquización de un sistema hidrográfico, considerando que la red hidrográfica está constituida por el curso principal o colector y sus tributarios. Se admite que cuando mayor es el número de orden del colector, mayor es la jerarquización de una red hidrográfica (Strahler, 1964).

– Frecuencia de ríos (Fr): es la relación que existe entre el número total de ríos de la cuenca (Nt) y el área de la misma (A en km<sup>2</sup>).

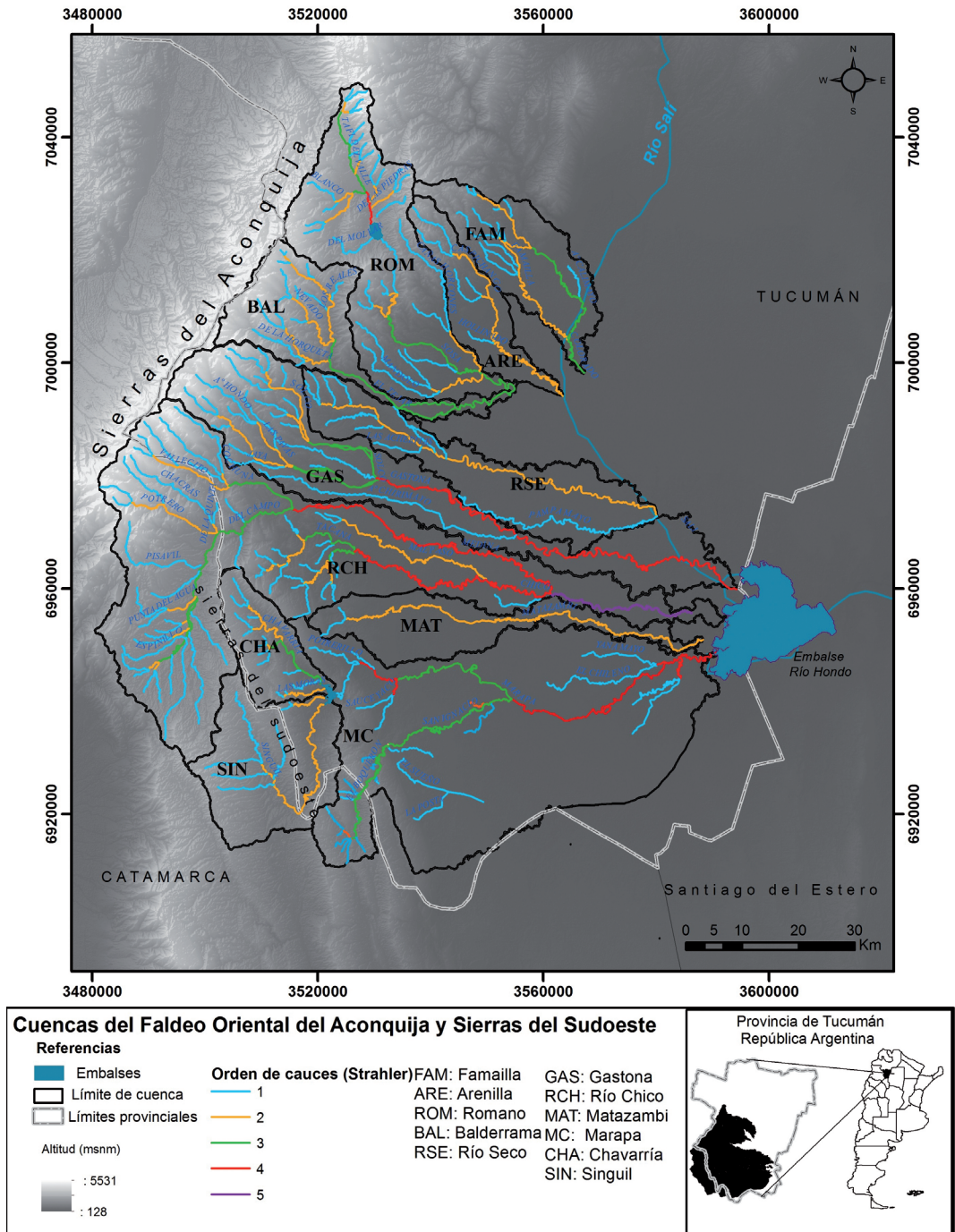
– Longitud media de los ríos de Orden 1 (Lm1) (Guido y Busnelli, 1993): se define como la relación entre la longitud total (en km) de los ríos de orden 1 (uno) (LT1) y el número total de ríos del mismo orden (N1). A partir de un enfoque hidrogeomorfológico se deduce que valores elevados de Lm1 indican ríos de primer orden más largos, mayor posibilidad de captar agua en menor tiempo y mayor tiempo de duración del escurrimiento directo o tiempo base (Tb). Mientras que valores bajos de Lm1 indican mayor número de río de orden 1, lo que aumenta la torrencialidad de una cuenca.

– Coeficiente de rugosidad de cuenca (Rd adimensional): vincula la densidad de drenaje con el relieve. Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca (H, km) y su densidad de drenaje (Dd, km.km<sup>-2</sup>).

Ecuación 4, Coeficiente de rugosidad (Rd):

$$Rd = H \times Dd$$

– Tiempo de concentración (tc) (hora): tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto



**Figura 2.** Modelo de elevación digital y Jerarquización de la red hidrográfica en las cuencas FOA y SS. Donde: **F**: Factor de forma; **Dd** (km<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>): Densidad de Drenaje; **Rb**: Relación de bifurcación; **Rlm**: Relación de longitud; **Plrn n+1**: Porcentaje de longitud de ríos de cada orden; **RHO**: Coeficiente de almacenamiento hídrico; **Kc**: Coeficiente de compacidad; **Ct**: Coeficiente de torrencialidad; **Dd1**: Densidad de drenaje de los ríos de orden 1; **LT n+1** (km): Longitud total de los ríos de orden n+1; **Nn+1**: Número de orden de los ríos; **Fr** (km<sup>2</sup>): Frecuencia de ríos; **Nt**: Número de orden total de los ríos; **Lm1**: Longitud media de los ríos de Orden 1; **Rd**: Coeficiente de rugosidad de cuenca; **Tc (h)**: Tiempo de concentración.

más alejado hasta la desembocadura de la cuenca (Chow *et al.*, 1994; Gaspari *et al.*, 2009) y depende de la forma de la cuenca.

– Hipsometría es una medida de la relación entre la elevación y el área en una cuenca o de captación (Strahler, 1952). La hipsometría en una cuenca está fuertemente relacionada con la respuesta a las inundaciones y la madurez de erosión de la misma (Ohmori, 1993). La curva hipsométrica (CH) representa el área drenada que varía con la altura de la superficie de la cuenca (Senisterra *et al.*, 2014). El relieve y la caracterización morfométrica de la cuenca tienen influencia en su respuesta hidrológica e incide en la dinámica geoespacial de la escorrentía superficial.

## RESULTADOS

Se presenta en la Figura 2 el mapa del Modelo de Elevación digital (DEM) cuya cota máxima es el Cerro El Bolsón de 5.552 msnm, en las Sierras del Aconquija y la cota mínima 300, en zonas de llanura cercanas al embalse de Río Hondo.

Se logró la delimitación de cada una de las cuencas hidrográficas en estudio representadas por los ríos: FAM: Famallá, ARE: Arenillas, ROM: Romano, BAL: Balderrama, RSE: Río Seco, GAS: Gastona, RCH: Chico, MAT: Matazambi, SIN: Singuil, CHA: Chavarría, MC: Marapa. En este estudio, la cuenca del río San Ignacio es considerada como una subcuenca de la cuenca MC. Además, se

obtuvo la distribución de la red de drenaje precisa a partir de la digitalización y ajuste con imágenes satelitales. Asimismo, se cuantificó el grado de jerarquización de la red de drenaje, representado en el mapa de orden de drenaje para cada cuenca (Figura 2). Según el grado de jerarquización del drenaje de acuerdo al número de órdenes de los ríos, la cuenca RCH presenta ríos de orden 5. Las cuencas GAS y ROM de orden 5. Mientras que en las cuencas SS, la cuenca MC es de orden 4 (Figura 2).

El análisis morfométrico caracterizó cada una de las cuencas FOA y SS, según parámetros relacionados a la forma, el relieve y la red hidrográfica. En cuanto al tamaño (A) de las cuencas según el criterio de Chow *et al.*, 1994, las cuencas FOA y SS se clasifican en cuencas medianas (Tabla 1).

Se elaboró el mapa de distribución de pendientes (%) el cual refleja la heterogeneidad altitudinal de las cuencas FOA y SS. En las cuencas analizadas los valores de pendiente media oscilan entre 5 % y 25 %.

Las cuencas FOA con mayor pendiente media (PM) corresponden a la cuenca río BAL (25%), ROM (20 %), RCH (15%) y GAS (13%). Las cuencas ARE y FAM con valores inferiores al 13 %. En las cuencas SS, se observó una pendiente media en CHA de 20 % y en SIN de 17 %, mientras que la cuenca MC y MAT, presentan 5 % y 6 %, respectivamente (Figura 3).

**Tabla 1.** Parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas.

	Cuencas	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Longitud axial (km)	H máxima (msnm)	H mínima (msnm)
FOA	ARE	283	155	42,49	2117	314
	BAL	464	243	43,91	1889	320
	FAM	436	191	58,57	3603	328
	RSE	614	307	50,94	4625	325
	ROM	937	273	65,45	1078	278
	GAS	1074	493	105,29	5130	270
	RCH	2097	329	114,04	3647	270
SS	CHA	257	113	69,96	685	271
	MAT	424	332	70,88	1492	270
	SIN	550	166	31,12	2168	678
	MC	2141	455	28,18	1953	648



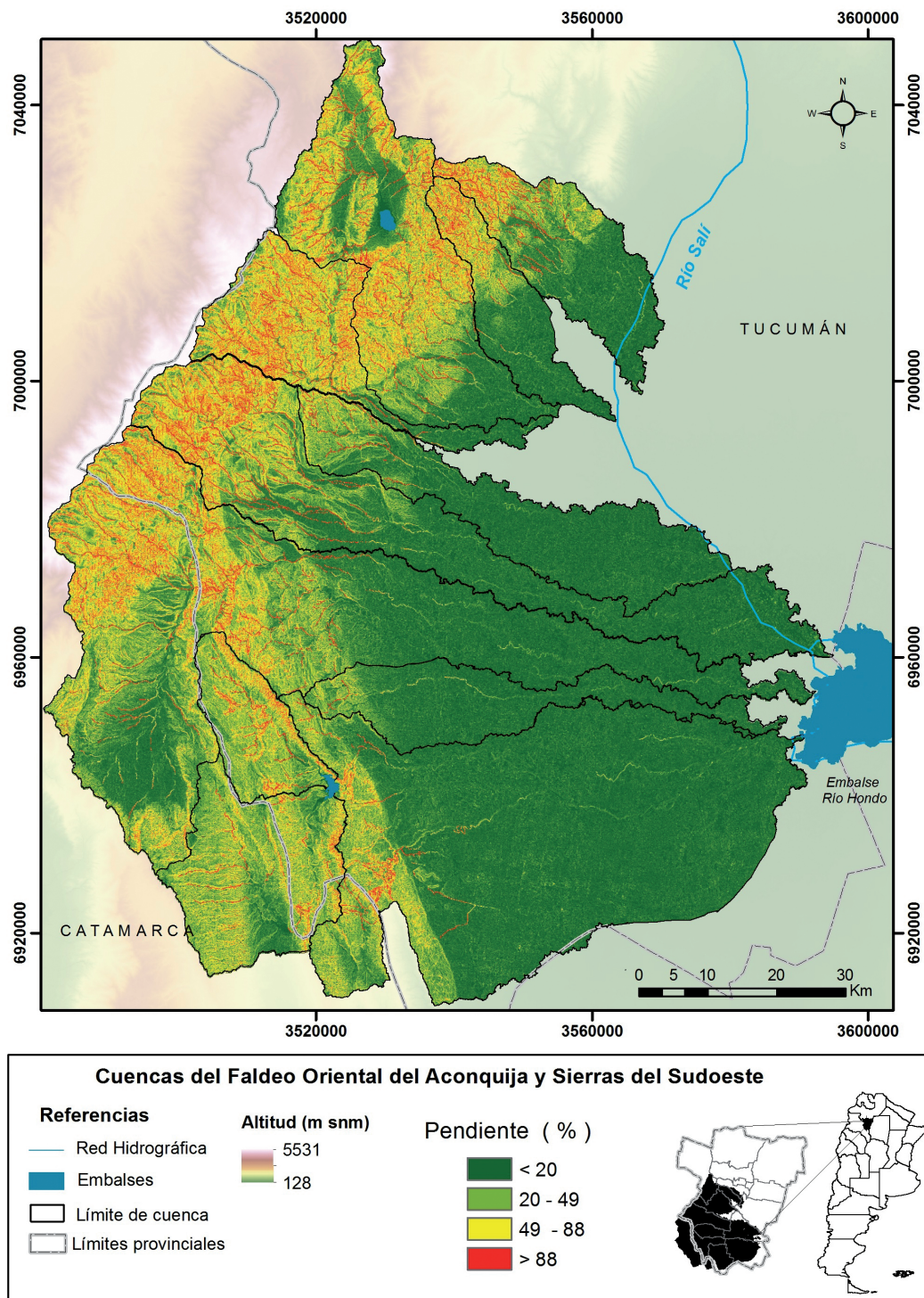


Figura 3. Mapa de porcentaje de pendientes en el área de estudio.

Los parámetros calculados a partir del DEM en las cuencas FOA y SS se presentan en la Tabla 2.

En relación al parámetro factor forma (F), las cuencas FOA presentan forma alargada, con un colector de mayor longitud que los tributarios. Mientras que en las cuencas SS, la cuenca del río SIN presenta un valor 0,57 indicando una forma levemente redonda.

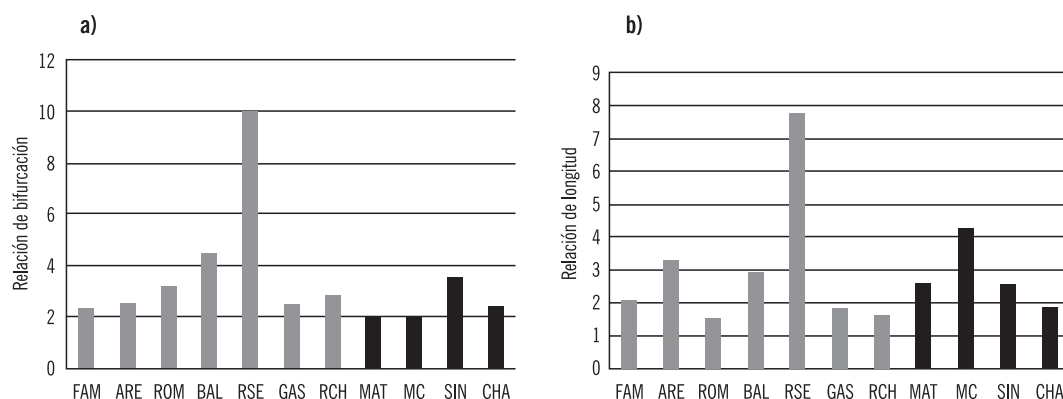
Entre los parámetros que caracterizan la red de drenaje, la densidad de drenaje (Dd), se observó entre valores entre 0,14 a 0,39 km /km<sup>2</sup>. La cuenca ROM alcanzó un valor de 0,22 km /km<sup>2</sup> presentando el máximo valor de Dd1 en las cuencas FOA y SS, le siguen la cuenca RSE con 0,21 km /km<sup>2</sup> y GAS con 19 km /km<sup>2</sup>, indicando predominio del escurrimiento ante la infiltración (Busnelli, 2009). Las cuencas CHA tomaron un valor de 0,12 km /km<sup>2</sup> y SIN con 0,15 km /km<sup>2</sup> presentan los valores máximos para las cuencas de SS, por lo tanto más rápida será la respuesta hidrológica de la cuenca frente a una tormenta (Gaspari *et al.*, 2013). Para el cálculo de la densidad drenaje se utilizó la red de drenaje de ríos y arroyos permanentes.

La relación de bifurcación (Rb) en las cuencas FOA presenta valores que oscilan entre 1,94 y 4,5. Se observaron valores entre 3 y 5 en las cuencas ROM, BAL y SIN, las cuales corresponden a cuencas con áreas de montaña sin demasiado control estructural (Verstappen, 1983). Mientras que valores menores a 2 suelen presentar altos riesgos de

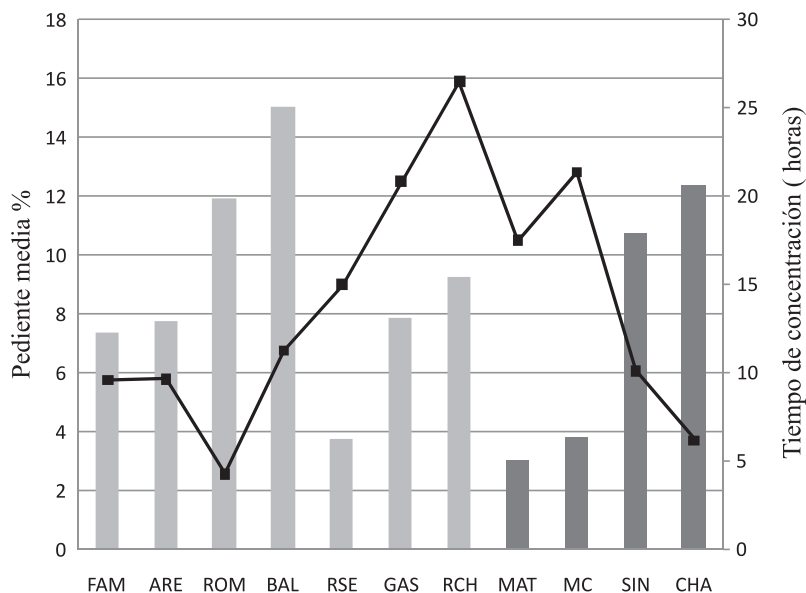
inundación por concentración brusca de la escorrentía y suelen corresponder a cuencas de menor pendiente según Gil *et al.* (2009), representada en el caso de las cuencas SS, de MC y MAT. Los valores superiores a 5 indican una fuerte dependencia estructural (Senciales González 1999, Streevi 2013 *et al.* 2013) como es el caso de la cuenca de RSE. Los valores obtenidos para la relación de bifurcación en cada cuenca se presentan en la Figura 4. Valores superiores a 2 de relación de bifurcación es indicador de la torrencialidad del área de drenaje, con mayor riesgo de crecida a la salida, como es el caso de las cuencas SIN y CHA en las SS (Strahler, 1964, López-Pérez *et al.* 2015) (Figura 4 a).

Los resultados alcanzados para la relación de longitud (Rl) en las cuencas ARE y RSE presentan valores superiores a 3, indicando que se trata de cuencas con concentración paulatina de caudales. El resto de las cuencas del FOA y las cuencas SS presentan valores inferiores a 3, correspondiente a cuencas torrenciales (Figura 4 b).

Los valores de porcentaje de longitud de ríos de cada orden (Plrn) se presentan en la Tabla 2, los cuales fueron utilizados para la cuantificación de los parámetros indicadores de torrencialidad. El coeficiente de almacenamiento hídrico (RHO) en las cuencas analizadas presentan valores entre 0,43 a 1,32. En las cuencas del FOA: ARE, GAS y RCH, y la SS: MAT, MC presentan los máximos valores indicando una mayor capacidad de almacenamiento hídrico en el



**Figura 4.** Izquierda: a) Relación de Bifurcación. Derecha: b) Relación de longitud.



**Figura 5.** Relación entre tiempo de concentración y pendiente media (%) en las cuencas de estudio.

cauce, relacionado con el tiempo en el que se alcanza el caudal máximo. Altos valores indican un tiempo de concentración mayor al caudal máximo, atenuando los procesos erosivos en las mismas.

De acuerdo a los valores obtenidos de Coeficiente de Compacidad ( $K_c$ ) las cuencas de la SS presentan valores cercanos a 2 indicando que se trata de cuencas circulares. En las cuencas del FOA,  $K_c$  supera a 2 (dos) tratándose de cuencas elongadas donde la red de drenaje tiende a ser menos compacta y los tiempos de concentración a ser mayores, y con mayor retardo en la escorrentía (Campo *et al.* 2012).

Coeficiente de torrencialidad ( $C_t$ ) las cuencas del FOA que presentan mayor valor de  $C_t$  son: BAL, ROM y dentro de las cuencas de las SS es la cuenca CHA.

Densidad de drenaje de ríos de orden 1 ( $Dd1$ ): las cuencas susceptibles a la erosión según el valor de la  $Dd$  de ríos de orden 1 son ROM, RSE y GAS. Mientras que las cuencas de la SS que presentan mayor densidad de drenaje son las cuencas CHA y SIN.

El Número de orden de los ríos indica que todos alcanzan un orden N2 y solo las cuencas FAM, BAL y CHA alcanzan el nivel N3. Las

cuencas con N4 son ROM, GAS y MC, logrando el nivel 5 solo la cuenca del RCH.

Frecuencia de ríos ( $Fr$ ) se refleja en la Tabla 2, indicando que la MAT presenta la menor frecuencia y la más elevada es la ROM, siendo el resto con valores promedios a las FOA y SS.

Longitud media de los ríos de Orden 1 ( $Lm1$ ) A partir de un enfoque hidrogeomorfológico se deduce que valores elevados de  $Lm1$  indican ríos de primer orden más largos, mayor posibilidad de captar agua en menor tiempo y mayor tiempo de duración del escurrimiento directo o tiempo base ( $T_b$ ). Las cuencas del FOA que presentan altos valores son: RSE, GAS y ARE y dentro de las cuencas SS, la SIN.

Por otro lado, se deduce que valores bajos de  $Lm1$  indican mayor número de ríos de orden 1, aumentando la torrencialidad de una cuenca. Según este criterio las cuencas con mayor torrencialidad son BAL con 4,21 km de longitud media de los ríos de orden 1 y ROM 6,42 km. Dentro de las cuencas SS la cuenca del río Chavarría (CHA) con 2,82 km.

Los resultados del coeficiente de rugosidad de cuenca ( $R_d$  adimensional), reflejan

**Tabla 2.** Parámetros relativos a la red de drenaje y Coeficientes de torrencialidad de las cuencas FOA y SS.

Parámetros	Cuencas										
	FOA							SS			
	FAM	ARE	ROM	BAL	RSE	GAS	RCH	MAT	MC	SIN	CHA
F	0,24	0,22	0,27	0,18	0,14	0,1	0,16	0,09	0,43	0,57	0,32
Dd (km/km <sup>2</sup> )	0,36	0,34	0,37	0,37	0,34	0,39	0,36	0,14	0,14	0,21	0,34
Rb	2,33	2,5	3,19	4,5	10	2,45	2,77	2	1,94	3,5	2,33
Rlm	2,1	3,3	1,56	2,92	7,75	1,86	1,65	2,58	4,29	2,55	1,88
Plrn 1	42,5	42,85	0,78	1,82	60,74	1,11	1,06	8,73	46,12	57,5	2,55
Plrn 2	32,5	57,14	3,62	4,02	39,25	2,72	2,45	91,26	7,41	42,5	
Plrn 3	25		0,3			1,76	2,42		27,41		
Plrn 4							0,69		19,03		
RHO	0,76	1,32	0,43	0,74	0,77	1,02	0,69	1,29	1,5	0,7	0,7
Kc	2,56	2,58	2,48	2,56	3,47	4,21	2,09	4,51	2,75	1,98	1,97
Ct	0,025	0,017	0,033	0,032	0,016	0,019	0,024	0,004	0,006	0,012	0,054
Dd1	0,15	0,14	0,22	0,12	0,21	0,19	0,18	0,02	0,06	0,12	0,15
LT	160	98	130	174	214	428	770	103	310	120	88
LT1 (km)	68	42	215	59	130	207	379	9	143	69	41
LT2 (km)	52	56	65	54	84	55	124	94	23	51	27
LT3 (km)	40		59	61		60	95		85		20
LT4 (km)			6			106	140		59		
LT5 (km)							32				
N1	11	5	31	14	10	21	52	2	14	7	14
N2	4	2	12	7	1	5	16	1	6	2	6
N3	1		3	1		3	5		4		2
N4			1			2	3		2		
N5							1				
Fr	0,036	0,024	0,05	0,047	0,021	0,028	0,036	0,007	0,012	0,016	0,085
Nt	16	7	47	22	11	31	77		26	9	22
Lm1	6,18	8,4	6,93	4,21	10,83	9,85	7,28	4,5	10,21	9,85	2,92
Rd	3.508	760	1.383	1.256	380	1.514	567	81	143	261	368
tc (hora)	5,76	5,78	2,56	6,75	8,99	12,5	15,88	10,48	12,79	6,06	3,71

el valor máximo para la cuenca del río ARE (3.508), y la mínima relación entre el desnivel y la densidad de drenaje se observa en la cuenca MAT, generando una alta rugosidad. Los resultados para este parámetro están detallados en la Tabla 2.

El tiempo de concentración (tc) en las cuencas FOA oscila entre 5 y 15 horas en las cuencas analizadas. El tc en la cuenca ROM es de 2 horas, en FAM es de 6 horas al igual para la cuenca ARE. En las cuencas SS, el mínimo tc se encuentra en la cuenca del río CHA siendo de 4 horas. Este parámetro está inversamente relacionado con la pendiente media de las cuencas, como se observa en la Figura 5.

Por último, la distribución hipsométrica en las cuencas FOA revela que las cuencas BAL, GAS y RCH tienen la máxima cota altitudinal a los 5.000 msnm, diferenciándose en forma del perfil latitudinal. Las cuencas ARE y FAM presentan su máxima cota altitudinal a los 3.000 msnm. A su vez, las cuencas BAL y ROM presentan el 50% de su área a una altura superior a los 2.000 msnm.

En las cuencas SS, se observa que la máxima altura, se encuentra en la cuenca SIN (3.000 msnm) y el 20 % de su superficie esta sobre los 2.000 msnm, mientras que en la cuenca CHA la máxima altura es de 2.500 msnm. La cuenca MC presenta el 50% de su área en alturas inferiores a los 1.000 msnm,



mientras que la cuenca MAT, presenta el 100 % de su superficie a esa cota (Figura 6).

### DISCUSIÓN

En este estudio se logra caracterizar morfométricamente las cuencas FOA y SS, las cuales se clasifican en cuencas medianas, la mayoría de forma alargada. Sin embargo, entre las cuencas SS, la cuenca SIN presenta una forma levemente circular, con tributarios de similar longitud y sincronismo a la llegada, con posibilidades de crecidas significativas (Gaspari *et al.* 2009, Sreedevi *et al.* 2013). Las cuencas con mayor pendiente son las cuencas BAL, ROM, y RCH, lo cual incide directamente en la velocidad del caudal a lo largo del cauce, condicionando su energía cinética y su potencial erosivo (Senciales González, 1999). En este sentido las cuencas con menor potencial erosivo son las cuencas MAT y MC. De acuerdo a la densidad de drenaje observada el proceso de escurrimiento superficial puede expresarse en valores superiores a la infiltración en las cuencas analizadas. Guido y Busnelli (1993), encontraron que la cuantificación de los ríos de orden 1, tiene relación con los procesos de erosión en cárcavas y barrancos en la cuenca alta y se traduce en un incremento de la longitud de cauces por área. De esta manera las cuencas con tendencia a la presencia de procesos de erosión son las cuencas ROM, RSE y GAS, SIN y CHA.

Las cuencas torrenciales en FOA son GAS y ROM debido a que presentan valores elevados de Dd1, mayor pendiente y valores altos de coeficiente RHO. Con respecto a las cuencas SS, las SIN y CHA presentan características torrenciales y menor tiempo de concentración ante eventos de precipitación. La densidad de drenaje está condicionada al clima, tipo de vegetación (Moglen *et al.*, 1998, Chauhan *et al.*, 2016) y aspectos edafológicos (Kelson y Wells, 1989, Angillieri 2012), por lo tanto, dependerá de la variabilidad en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones.

La respuesta hidrológica de las cuencas esta relacionada con las características morfométricas analizadas, como se refleja en este estudio y en coincidencia con el registro eventos de inundación durante el mes de enero de los años 2007, 2009, 2015, coincidiendo espacialmente este evento (Figura 7), en las cuencas con parámetros torrenciales como la cuenca GAS y SIN. Estos resultados son coincidentes con los de Busnelli y Horta (2013), quienes identificaron a la cuenca del GAS con características torrenciales.

La interpretación de los parámetros morfométricos debe tomarse con cautela ya que pueden representar valores subjetivos; sin embargo, la información aportada ofrece un diagnóstico preliminar para zonas con escasa información. Se trata de un método robusto para caracterizar tanto cuencas de

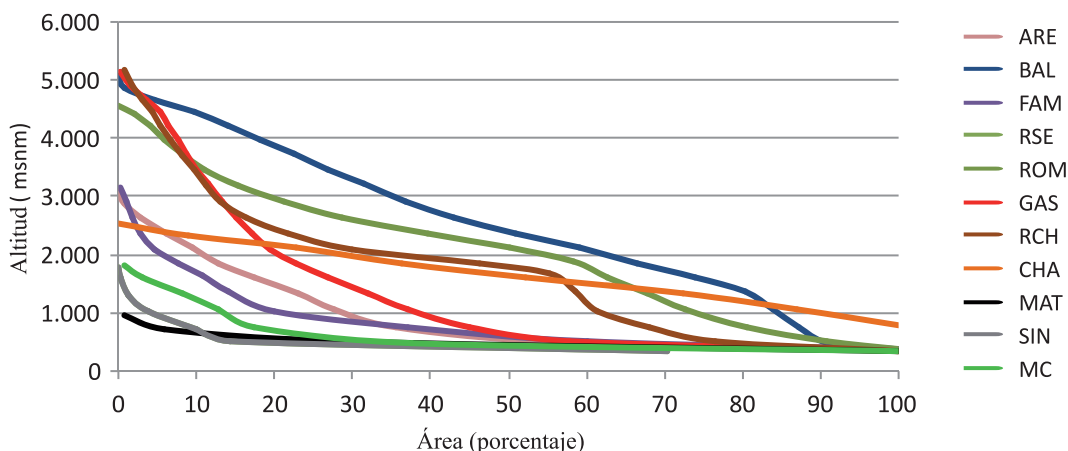


Figura 6. Curva hipsométrica de las cuencas FOA y SS.



**Figura 7.** Río Singuil, crecida del día 14 de abril de 2015. Fuente: La Gaceta.

llanura (Delgado *et al.* 2010) como cuencas de montañas (Kumar y Joshi 2016).

La importancia de las características morfométricas y su interacción con el uso y cobertura del suelo determinarían la respuesta hidrológica ante la variabilidad climática en estas cuencas, sugiriendo que este tipo de análisis constituya la base para estudios posteriores ecohidrológicos, hidrogeomorfológicos y análisis de riesgos de inundación y degradación de tierras.

Por último, el desarrollo de la geoinformática permitió obtener parámetros morfométricos en forma automatizada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Delgado y Gaspari 2010) a partir de las mejoras en la precisión de la resolución espacial de los modelos de elevación digital (DEM), constituyendo potenciales herramientas para el desarrollo de estudios base para el ordenamiento territorial.

Caracterizando la cobertura y uso del suelo en las cuencas estudiadas, se identifica que es un factor que podría incrementar o amortiguar la respuesta hidrológica ante eventos extremos de precipitación, al interactuar con las características morfométricas de las mismas. En las cuencas FOAS y SS se observó que el 35% (3.277 km) de su superficie presenta cobertura boscosa, por arriba de los 700 msnm en el año 2010, atenuando el pico de la respuesta hidrológica, a pesar de las características morfométricas torrencales que se detallaron en este estudio. Sin embargo, en la zona del pedemonte el uso del suelo para cultivos incrementa la vulnerabilidad al escurrimiento superficial (Díaz Gómez, 2015). Por lo tanto, los cambios en el uso y cobertura del suelo en la zona del pedemonte de las cuencas, representarían impactos directos en la relación infiltración-escurrimiento asociados a las características morfométricas de las mismas.

## CONCLUSIONES

Los parámetros morfométricos calculados representan un estudio comparativo de cuencas hidrográficas (escala 1:50.000) asistido con un control de precisión en base a imágenes satelitales, procesados con SIG y con un modelo hidrológico de acceso libre. Se ha realizado una relación objetiva y cuantificable de parámetros morfométricos analizando su posible respuesta ante eventos extraordinarios de precipitación y conformando un procedimiento inicial para el diagnóstico de la dinámica espacio temporal del escurrimiento superficial en cuencas sub-tropicales del Noroeste de Argentina.

Las cuencas FOA y SS presentan alta variabilidad de características morfométricas, que han sido jerarquizadas según su torrencialidad, densidad de drenaje, longitud media de los cauces, tiempo de concentración, entre otros, clasificándolas como de tamaño mediano y la mayoría de forma alargada. Las cuencas FOA que presentan características torrenciales son las FAM, BAL, ROM y RCH; mientras que las cuencas SS de mayor torrencialidad son SIN y CHA, la cual presenta el Ct más extremo. Estas cuencas son prioritarias para la ejecución de planes de manejo integral, debido a la susceptibilidad intrínseca de sus características morfométricas ante eventos de cambio global (cambio climático y cambio de uso y cobertura del suelo).

Es importante mencionar que la cuenca del RCH presenta la mayor significancia en relación a las características del sistema de drenaje, expresando la mayor densidad, frecuencia y orden de ríos; siendo el extremo contrario la cuenca MAT, la de menor significancia.

La base de datos generada y la metodología de estudio planteada conforman una propuesta de integración de información georreferenciada para el desarrollo de planes de manejo integral y ordenamiento territorial en las cuencas FOA Y SS.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dra. Lucía Marina Ibañez, Instituto de Sedimentología., Facultad

de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, por su valiosa colaboración.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de la beca doctoral y postdoctoral de CONICET.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, F. G. y Toselli A. J. 1981. Geología del Noroeste Argentino. Facultad de Ciencias Naturales. UNT. Publicación N° 1287. San Miguel de Tucumán. Tucumán. Argentina. 212 p.
- Angillieri, M. Y. E. (2012). Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan. Argentina. *Quaternary International* 253: 74-79.
- Arcuri, C. B. 1995. Theory and Concepts of Flood Hazard Assessment. In: *Flood Hazard Assessment and Zonation-Medinas River* (Tucumán-Argentina). Chapter 3: Master of Sciences. ITC (International Institute for Geo-Informatics and Earth Observation). Enschede, Holland. 1: 26-64.
- Busnelli, J. 2009. Evolución Histórica, Situación actual y perspectivas futuras del riesgo de Inundación en la Cuenca del río Gastona. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Universidad Nacional de Tucumán. Inédita.
- Busnelli, J. y Horta, L. R. 2013. Morfometría de cuencas Montanas y Metamorfosis fluvial, Tucumán. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (1): 11-20.
- Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas noroccidentales. Segundo simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. I: 225-291.
- Campo M. C., Aldalur N. B y Fernández, S. N. 2012. Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 77: 7-17.
- Cellini, J. 2005. Estado y Propuesta de Manejo de los Recursos Naturales de la Cuenca del Arroyo Grande, Tierra del Fuego. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de La Plata Argentina. 133 p.
- Chauhan, P., Chauniyal, D. D., Singh, N., y Tiwari, R. K. 2016. Quantitative geo-morphometric and land cover-based micro-watershed prioritization in the Tons river

- basin of the lesser Himalaya. *Environmental Earth Sciences* 75 (6): 1-17.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. 575 p.
- Dal Molín, C. N.; Fernández, D. y Escosteguy, L. 2003. Hoja geológica 2766-IV. Concepción. Provincias de Tucumán, Catamarca y Santiago del Estero. Programa Nacional de cartas Geológicas de la República Argentina. 1:250000. Supervisión: González, O. Boletín N° 342. SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino). Buenos Aires. Argentina. 41 p.
- Delgado, M. I. y Gaspari, F. 2010. Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina. *Revista Tecnociencia*. México. Vol. IV. 3, 154-163.
- Díaz Gómez, R. 2015. Tesis doctoral. Análisis de la vulnerabilidad a cambios climáticos y de uso del territorio de las cuencas hidrográficas del faldeo oriental de la sierra del Aconquija y del Sudoeste, Tucumán. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. 230 p.
- Fernández, D. S., Lutz, A. M., García, M. G., Hidalgo, M. Del V., Sirombra, M., Neder, L., García Azcárate, J. y Villegas, D. 2004. Carta de Líneas de Base Ambiental 2766-IV "Concepción". Provincias de Tucumán, Catamarca y Santiago del Estero. SEGEMAR. Argentina. 149 p.
- Gaspari, F. J. 2002. Ordenamiento territorial en cuencas serranas. Aplicación de SIG. Ed. Cooperativas. Buenos Aires. Argentina. 116 p.
- Gaspari, F. J. Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I. y Besteiro, S. I. 2013. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande. AUGMDOMUS. Argentina. 4: 43-158.
- Gaspari, F. J.; Senisterra, G. E.; Delgado, M. I.; Rodríguez Vagaría, A. y Besteiro, S. 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Ed. Universidad Nacional de La Plata. La Plata. Argentina. 321 pp.
- Georgieff, S. M. 2007. Aspectos hidrológicos de la cuenca del río Salí. En D.S. Cicerone y M. V. Hidalgo. (Eds.), Los humedales del Río Salí, Argentina. Jorge Baudino Ediciones. Buenos Aires. Argentina, 29-48.
- Gil, V., J. Gentili y Campo, A. 2009. Influencia de la litología en la variación de los parámetros morfométricos, Sistema de Ventania, Argentina. *Papeles de Geografía*, Murcia, España. Núm. 49-50, pp. 55-68.
- Giraut, M. A., Valladares, A. I., Ruiz, A., Rey, C. A., Dente, V. y Ludueña, S. 2007. Cartografía hídrica superficial de la provincia de Tucumán. Congreso Nacional del agua. Argentina. Actas: 12 p.
- Guido, E. y Busnelli, M. 1993. Criterios morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de una cuenca hídrica (Río Las Cañas, Catamarca). 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Mendoza. Argentina. Actas Tomo 4: 112-122.
- Guido, E. y., Sesma, P. J. y Puchulu, M. E. 1998. Capítulo: Marco Geográfico de Tucumán. Geología de Tucumán. (Segunda edición). Publicación del Colegio de Geólogos de la Provincia de Tucumán. Tucumán. Argentina. 1: 21-27.
- Henaos J. E. 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza descolarizada. Ed. Usta. Bogotá, Colombia. 396 p.
- Horton, R. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrological approach to quantitative morphology. *Geological Society American Bulletin* 56: 275-370.
- Kelson, K. I. y Wells, S. G. 1989. Geologic influences on fluvial hydrology and bed load transport in small mountainous watersheds northern New Mexico USA. *Earth Surface Processes* 14: 671-690.
- Kumar P. y Joshi, V. 2015. Characterization of hydro geological behavior of the upper watershed of river Subarnarekha through morphometric analysis using remote sensing and GIS approach. *International Journal of Environmental Sciences*. Volume 6 (4) 442.
- Langbein, W. B. y Leopold, L. B.; 1966. River meanders: theory of minimum variance, United States Geological Survey Professional Paper. USA. 422 pp.
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R. y Fernández-Reynoso, D. S. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua* 6 (1): 121-137.
- Mesa, L. M. 2006. Morphometric Analysis of a Subtropical Andean Basin (Tucumán, Argentina). *Environmental Geology* 50 (8): 1235-42.
- Moglen G. E., Eltahi, E. A. y Bras, 1998. On the sensitivity of drainage density to climate change. *Water Resource R. L Research* 34: 855-862.



- Mon, R. y Mansilla, N. 1998. Estructura Geológica del Territorio de la Provincia de Tucumán. En: Geología de Tucumán. Publicación especial Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán. Argentina. pp. 147-153.
- Morisawa M. E. 1959. Relation of morphometric properties to runoff in the Little Mill Creek, Ohio, Drainage Basin, Tech. rep. 17. Columbia University, Department of Geology, ONR, New York. USA.
- Neder, L. y Puchulu, M. E. 1995. Análisis integrado de la torrencialidad de una cuenca intramontana (Río Muerto), Tucumán-Argentina. I Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Cantú, E. (Ed.). Río Cuarto. Córdoba. Argentina. Actas Tomo I: 89-100.
- Ohmori H. 1993. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology* 8: 263-277.
- Ramos, V. A. 1999. Las Provincias Geológicas del Territorio Argentino. En: Geología Regional Argentina. Publicación del Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires. Argentina. *Anales* 29: 41-96.
- Rohmeder, G. 1949. Bosquejo fisiogeográfico de Tucumán. Universidad Nacional de Tucumán. Instituto de Estudios Geográficos. Argentina. Monografías. 6.
- Sala, M. y Gay, R. 1981. Algunos datos morfométricos de la cuenca de Isábena, Notes de Geografía Física, N° 4, Department de Geografia, Universitat de Barcelona, Barcelona. España. pp. 41-65.
- Senciales González, J. M. 1999. Redes Fluviales, metodología de análisis. Ed. Universidad de Málaga, Málaga. España. 337 p.
- Senisterra, G., Rodríguez Vagaría, A., Gaspari, F. y Mazzucchelli, G. 2014. Aspectos morfométricos de la cuenca alta del Arroyo Napaleofú. Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana Venezuela*. 55 (2): 287-303.
- Sreedevi, P. D., Sreekanth, P. D., Khan, H. H. y Ahmed, S. 2013. Drainage morphometry and its influence on hydrology in an semi arid region: using SRTM data and GIS. *Environmental earth sciences* 70 (2): 839-848.
- Strahler A. N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63: 1117-1142.
- Strahler A. N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38 (6): 913-925.
- Strahler, A. N. 1964. Quantative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Te Chow, Ven. (Ed.), *Hand Book of Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York. USA. 439-476.
- Toledo, M. 2005. Geología del Cuaternario y Evolución Paleambiental e Hidrogeomorfológica de La Cuenca del Río San Ignacio – Marapa (Provincias de Catamarca y Tucumán, Rep. Argentina). Tesis Doctoral inédita. Facultad de Cs. Naturales, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán. Argentina. 290 p.
- Verstappen, H. 1983. *Applied Geomorphology. Geomorphological Survey for environmental Development*. Ed. Elsevier. The Netherlands. 437 p.